第29卷 第8期 材 料 研 究 学 报 Vol. 29 No. 8
2015 年 8 月 CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH August 2015

含P高强IF钢的高温力学性能*

闫永其 崔 衡 王 征 赵爱民

(北京科技大学冶金工程研究院 北京 100083)

摘 要 使用Gleeble3500热模拟试验机测定零塑性温度(ZDT)、零强度温度(ZST)及最大抗拉强度随温度的变化, 用扫描电镜观察分析不同拉伸温度下的断口形貌, 使用THERMO-CALC软件计算其冷却过程中的相变及析出相, 研究了含P高强IF钢的高温力学性能。结果表明, 该钢种的ZDT和ZST分别为1420℃和1445℃, 第Ⅰ脆性区间为1400℃-熔点, 不存在第Ⅲ脆性区间, 铸坯表面裂纹不是在矫直过程中形成的; 铸坯的最大抗拉强度随着拉伸温度的升高而降低, 在1300℃以上最大抗拉强度均低于5.3 MPa; 高强IF钢连铸坯冷却至500℃-200℃时析出大量Fe_3P, 可能导致铸坯冷脆开裂。采用热装工艺, 可以降低高强IF钢铸坯表面横裂纹出现的机率。

关键词 金属材料, 高温力学性能, 高温拉伸, 含P高强IF钢, THERMO-CALC, 相变

分类号 TF 777 文章编号 1005-3093(2015)08-0602-05

High Temperature Mechanical Properties of P-Containing High Strength IF Steel

YAN Yongqi CUI Heng** WANG Zheng ZHAO Aimin

(Engineering Research Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing100083, China)

*Supported by Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project No. YETP0411 and Fundamental Research Funds for the Central Universities No. FRF-TP-14-102A2.

Manuscript received December 28, 2014; in revised form June 12, 2015.

**To whom correspondence should be addressed, Tel: (010)62332598-6830, E-mail: cuiheng@ustb.edu.cn

ABSTRACT The high temperature mechanical properties of P-contained high strength interstitial free (IF) steel were investigated using Gleeble3500 thermal simulation testing machine, in terms of zero ductility temperature (ZDT), zero strength temperature (ZST) and the relationship of tensile strength with temperature. The fractured surfaces at different tensile temperatures were characterized by means of scanning electron microscope. The phase transition temperature interval was deduced by the THERMO-CALC software. The results show that the ZDT and ZST of the steel are 1420℃ and 1445℃, respectively. The brittleness temperature interval Ⅰ is from 1400℃ to the melting point, and there is no the brittleness temperature interval Ⅲ. The transverse cracks on the surface of casting blank did not occur during the straightening process. The tensile strengths decrease with the increasing temperature in the test temperature range, and which are lower than 5.3 MPa above 1300℃. The result of THERMO-CALC calculation shows that, with the specimens cooling from 500℃ to 400℃, Fe_3P precipitates out in the α-Fe matrix, which may results in cold short. The transverse cracks on the continuous casing (CC) slab could dramatically be reduced by Hot-charging Technology.

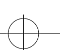
KEY WORDS metallic materials, high temperature mechanical properties, high-temperature tension test, P-contained high strength IF steel, THERMO-CALC, phase transition

汽车工业的发展迫切要求车身减重和提高抗冲击性能, 因此高强度钢的生产迅速发展。其中以IF为基础发展而来的高强IF钢已广泛应用于汽车生产中, 其基体中的C、N原子被Ti、Nb完全固定, 没有间隙原子存在, 有利于织构在退火过程中优先生长。因此, 高强IF钢具有良好的深冲性能, 又通过添加P、Mn和Si等元素达到固溶强化, 在提高强度的同时又不影响其延展性和塑性变形比r值[1-4]。某钢厂生产的含P高强IF钢连铸坯线下检查发现表面横裂纹, 严重影响板坯生产合格率。本文使用热模拟试验机Gleeble3500研究该钢种铸坯的高温力学性能, 并应用THERMO-CALC计算其冷却过程中

* 北京市青年英才计划YETP0411和中央高校基本科研业务费专项资金FRF-TP-14-102A2资助。

2014年12月28日收到初稿; 2015年6月12日收到修改稿。

本文联系人: 崔 衡



的相变及析出相, 为连铸及热轧参数控制提供理论参考。

1 实验方法

实验用高强IF钢的生产工艺为210t BOF—210t RH—CC, 其主要化学成分列于表1。取正常连铸坯进行高温热塑性研究, 断面尺寸为1300 mm×230 mm, 在铸坯宽度1/2到1/4之间、靠近内弧侧取拉伸试样, 试样长度方向为拉坯方向。拉伸试样的直径为10 mm长度为121.5 mm, 两端螺纹长15 mm, 螺纹间距为1.5 mm。

使用Gleeble3500热模拟试验机研究高强IF钢的高温力学性能, 可得到试样的断面收缩率(ψ)及最大抗拉强度(σ_{max}值)随温度的变化情况, 从而测定该钢种的ZDT值和ZST值, 即ψ值为零、σ_{max}值为零时对应的温度[5, 6]。

为了模拟连铸坯的实际生产情况, 先将试样以10℃/s的速率加热到1375℃保温3 min, 消除试样组织内应力, 然后以3℃/s的速度冷却至拉伸温度, 再次保温3 min后以1×10^{-3} s^{-1}的应变速率拉伸, 在试验过程中通Ar气进行保护。高温拉伸实验温度制度, 如图1所示。

高温拉伸实验的温度区间为650℃-1430℃, 在800℃-1000℃温度区间内实验温度间隔为25℃, 1400℃以上实验温度间隔为10℃, 其它温度区间内实验温度间隔为50℃。试样拉断后立即对断口喷吹大量压缩空气进行冷却, 以保留断口的高温组织形貌。在扫描电镜下观察断口宏观形貌, 分析其断裂类型。

使用Thermo-Calc软件的Fe基合金数据库进行热力学模拟计算, 以得到实验用钢铸坯在冷却过程中析出的平衡相的析出温度和析出量。

2 结果和讨论

2.1 高温抗拉强度

钢的最大抗拉强度是指钢材抵抗均匀塑性变形的最大应力。在连铸过程中铸坯上的某一点受力超过σ_{max}时, 铸坯产生裂纹。高强IF钢铸坯σ_{max}与温度的关系, 如图2所示。可以看出, 随着拉伸温度的提高σ_{max}逐渐减小。在650℃-800℃范围σ_{max}急剧降低, 在800℃-1250℃范围内σ_{max}随着拉伸温度的提高缓慢减小, 在1250℃降至24.2 MPa; 在1250℃-1300℃ σ_{max}明显降低, 在1300℃其值为5.3 MPa; 在1430℃ σ_{max}为2.4 MPa, 线性拟合后得到高强IF钢的零强度(ZST)为1445℃。

拉伸温度超过1300℃后, 高强IF钢的σ_{max}均小于5.3 MPa。这个结果说明, 该钢种在1300℃以上抗拉强度较低。如果连铸坯在1300℃以上受到较大的应力, 铸坯很容易产生裂纹缺陷。因此, 在生产过程中应该保证连铸机精度, 避免铸坯在高温段受到不均匀应力而产生裂纹。

2.2 高温热塑性

断面收缩率ψ是试样在拉伸断裂后断口截面缩小面积与原试样横截面积的百分比, 是衡量铸坯塑性好坏的重要指标。ψ值越大, 铸坯抵抗外力而不产生裂纹的可能性就越大。

高强IF钢铸坯高温拉伸试样的ψ值随着拉伸温度的变化趋势, 如图3所示。文献[7, 8]提出, 当ψ值大于60%时, 钢不易出现裂纹。也有研究表明[9, 10], ψ值小于40%时铸坯裂纹敏感性大大增强。若以ψ=40%作为判断塑性好坏的临界点, 本文得到该钢种的第Ⅰ脆性温度区间为1400℃-熔点。在900℃-1000℃范围内塑性有所降低, 在950℃ ψ值达到最小值61.7%, 但远大于40%。这说明, 该钢种没有第III脆性温度区间, 铸坯表面横裂纹不是在矫直过程中形成的。

在1000℃-1250℃铸坯韧性非常好, ψ值均在80%左右。拉伸温度超过1250℃后铸坯热塑性逐渐下降, ψ值由拉伸温度为1250℃时的79%降至拉伸温度为1400℃时的58.8%。而到1410℃试样ψ值只有4.5%。因此, 在连铸过程中应该避免铸坯在1400℃以上停留过长的时间以降低产生热裂纹的概率。在1420℃和1430℃ ψ值均为零, 表明该钢种的零塑性温度为1420℃。零强度温度与零塑性温度差值为25℃, 凝固前沿脆化温度区间较小, 表明该钢种铸坯有较好的抗高温裂纹特性。

2.3 断口形貌分析

拉伸断口形貌可以直观地反映断裂类型。用扫描电镜观察拉伸温度为650℃、800℃、900℃、950℃、1000℃和1150℃时试样的断口形貌, 结果如图4所示。

表1 试样的化学成分

Table 1 Composition analysis of experimental steels (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Alt	N	Nb	Ti
0.002	0.726	0.549	0.089	0.01	0.036	0.002	0.033	0.023

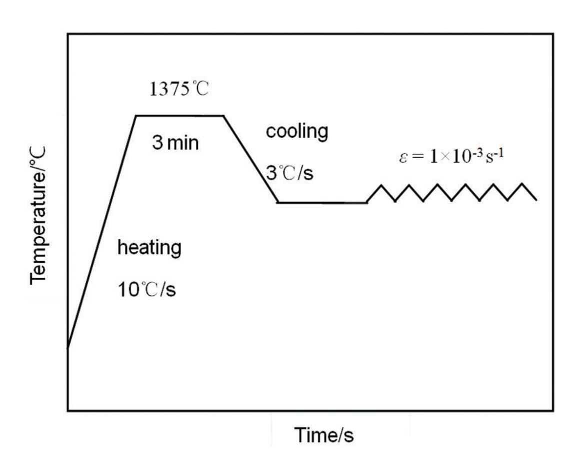


图1 高温拉伸实验温度控制示意图

Fig.1 Sketch map of temperature control during tensile tests

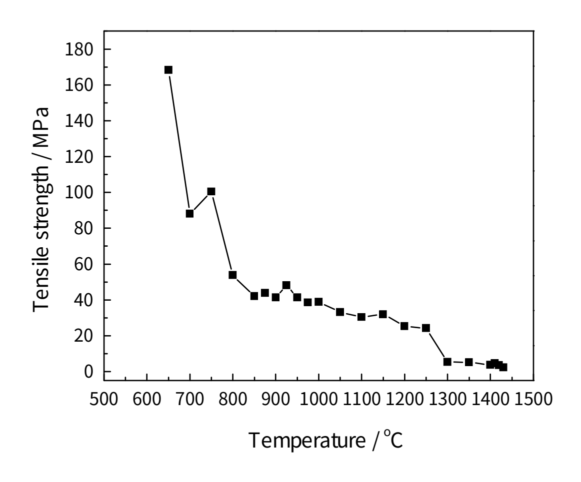


图2 最大抗拉强度与温度的关系

Fig.2 Relationship between tensile strength and temperature

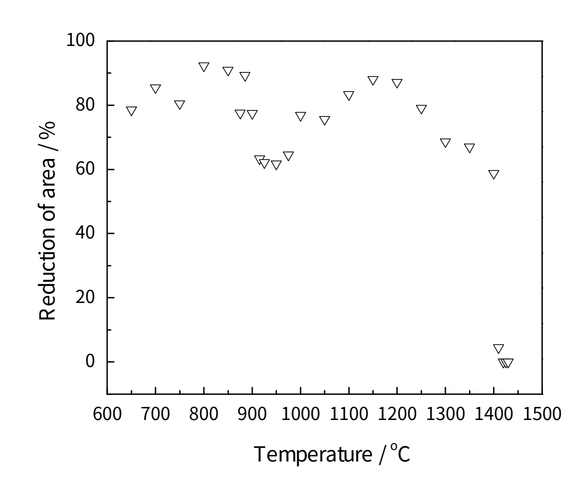


图3 断面收缩率随温度的变化

Fig.3 Variation of area reduction with temperature

650℃时的高温拉伸断口, 如图4a所示。可见断口处有大量细小的韧窝, 属于典型的塑形断裂; 在800℃韧窝较大且数量明显减少, 但韧窝很深, ψ值达92.4%; 在950℃对应的断口由大量颗粒组成, 如图4d、4h所示。颗粒呈现光滑的"冰糖状", 属于典型的脆性沿晶断裂, 但其ψ值达到61.7%; 900℃和1000℃时断口形貌相似, 如图4c、4e所示。可见韧窝数量比650℃时对应的韧窝数量少, 但韧窝较大、较浅, ψ值均在77%左右; 在1150℃断口形貌与800℃时断口相似, ψ值达到88%。断口形貌的分析结果表明, 在650℃-1050℃范围内试样拉伸断裂方式以韧性断裂为主, 只有950℃时对应的断口处呈现脆性断裂形貌。

2.4 THERMO-CALC计算结果

使用Thermo-Calc软件计算出高强IF钢平衡相图(多元体系性质图), 并绘制各相中元素的分布曲线图, 从而判别相图中各相的成分, 如图5所示。在1350℃左右该钢种的晶体结构由体心立方向面心立方转变, 即由δ铁素体向奥氏体转变; 在1000℃-900℃该钢种晶体结构又由面心立方向体心立方转变, 即由奥氏体转变为α铁素体。这个结果表明, 该钢种在900℃-1000℃塑性较差的原因是基体由奥氏体向α铁素体转变。

由图5可知, 在大约1420℃基体中开始析出TiN, 在1200℃析出基本结束, 析出量约为2×10^{-4}; 在900℃左右基体中开始析出NbN, 而到500℃由面心立方的NbN转化为密堆六方结构的NbC, 400℃时基本转化完成, NbC的析出量约为5×10^{-4}。根据NbN和NbC在α铁素体中的平衡固溶度积公式

$$\lg\{[\mathrm{Nb}]\times[\mathrm{N}]\}_{\alpha} = 4.96 - 12230/T \quad (1)$$

$$\lg\{[\mathrm{Nb}]\times[\mathrm{C}]\}_{\alpha} = 5.43 - 10960/T \quad (2)$$

估算[11], 二者的平衡固溶温度分别为658℃和532℃, 说明在该钢种中NbC比NbN更稳定, 故发生由NbN到NbC的转化。TiN和NbC的析出, 说明Ti和Nb能很好的固定间隙原子C、N, 从而提高铸坯塑性, 且绝大部分N原子在高温阶段即被Ti固定, 而C原子则在500℃左右被固定。

铸坯冷却至约500℃基体开始析出含P析出相Fe_3P, 可计算出200℃时Fe_3P析出量达到0.63%。

磷在晶界偏聚浓度较低时磷以固溶体存在于晶界[12], 当磷偏聚浓度高时晶界形成类似Fe_3P的结构。本文实验用钢的P含量高达0.089%, 基体在500℃-200℃析出的M_3P应为Fe_3P, 该相中元素的分布曲线图也将其确定为Fe_3P。Fe_3P硬度高且沿晶界分布, 与基体α-Fe之间存在较大的应力, 强化效果显著, 使钢的韧性、塑性明显降低[13, 14]。本文实验用钢种冷却到200℃时Fe_3P析出量达到0.63%, 基体中大量析出Fe_3P可能导致铸坯冷脆而出现表面裂纹。因此, 采用热装工艺时高强IF钢铸坯热装时的温度应

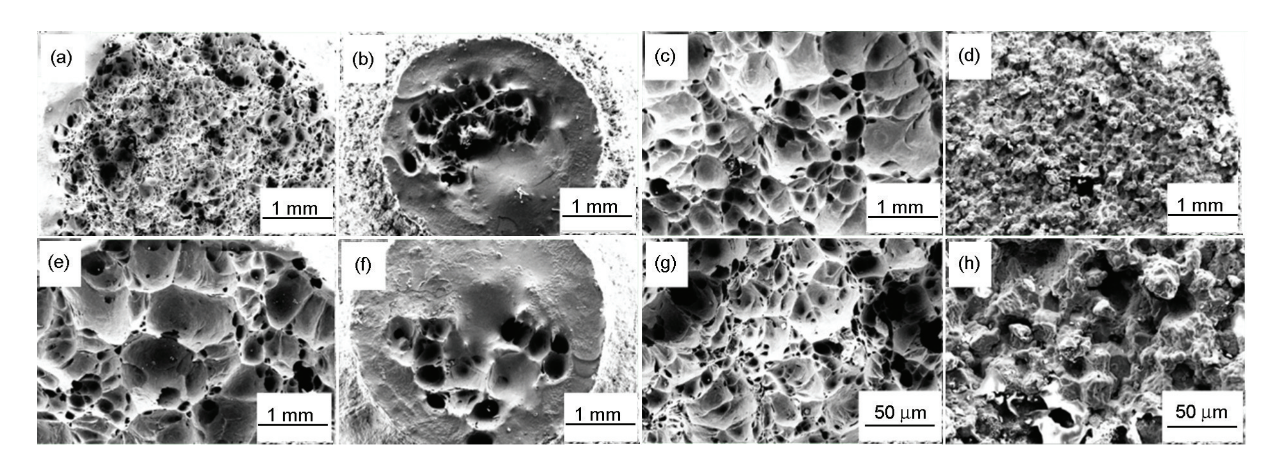


图 4 在不同温度下拉伸断口的宏观形貌和显微形貌

Fig.4 Morphology of fracture at 650℃ (a), 800℃ (b), 900℃ (c), 950℃ (d), 1000℃ (e), 1050℃ (f) and microscopic morphology of fracture at 650℃ (g), 950℃ (h)

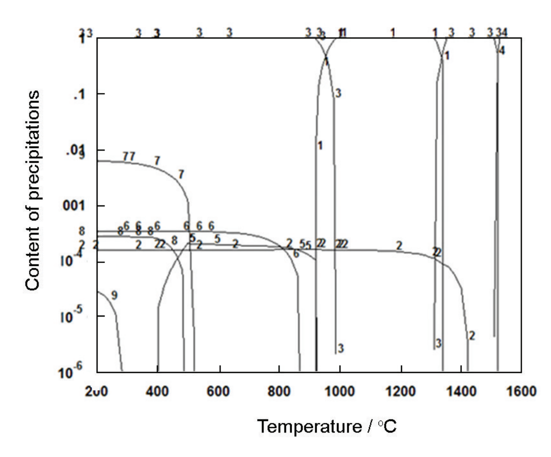


图 5 高强 IF 钢的平衡相图

Fig.5 Equilibrium phase diagram of high strength IF steel (1-γ-Fe (Austenite); 2-TiN; 3-α-Fe (Ferrite); 4-Liquid; 5- NbN; 6- Pyrrhotite; 7- Fe_3P; 8- NbC; 9- LAVES Phase)

该在 500℃以上, 以防铸坯中析出 Fe_3P。

3 结 论

1. 高强 IF 钢的零塑性温度为 1420℃, 零强度温度为 1445℃, 凝固前沿脆化温度区间较小, 铸坯有较好的抗高温裂纹特性。

2. 应变速率为 $1\times10^{-3}s^{-1}$ 时高强 IF 钢的第 I 脆性温度区间为 1400℃-熔点, 在 900℃-1000℃ 范围内塑性有所降低, 最小值为 61.7%, 因此没有第III脆性温度区间, 铸坯横裂纹不是在矫直过程中形成的。高强 IF 钢在 900℃-1000℃ 范围内塑性降低的原因是基体由奥氏体向α铁素体转变。

3. 高强 IF 钢铸坯高温阶段抗拉强度较差, 拉伸温度高于 1300℃时最大抗拉强度均低于 5.3 MPa, 应该避免铸坯在 1300℃以上承受较大的应力。

4. 高强 IF 钢铸坯在 500℃-200℃析出质量分数为 0.63%的 Fe_3P, 导致铸坯冷脆开裂。

参 考 文 献

1 MA Mingtu, *Advanced Automobile Steel*, (Beijing, Chemical Industry Press, 2007) p. 35
(马鸣图, 先进汽车用钢, (北京, 化学工业出版社, 2007) p. 35)

2 LI Shouhua, LI Jun, Progress in research of high strength IF steel for automotive applications, Shang Hai Metals, **29**(5), 66(2007)
(李守华, 李 俊, 汽车用高强度 IF 钢的研究进展, 上海金属, **29**(5), 66(2007))

3 WU Qingsong, OUYANG Yexian, ZHAO Jiangtao, DUAN Xiaoping, LONG an, Impact tensile behavior of high strength IF steel sheet, Research of Iron and Steel, **40**(2), 33(2012)
(吴青松, 欧阳页先, 赵江涛, 段小平, 龙 安, 高强 IF 钢的高速应变行为, 钢铁研究, **40**(2), 33(2012))

4 WANG Chang, YU Yang, WANG Lin, CHEN Jin, XU Haiwei, Research on the factors inducing strip fracture of high strength IF steel containing phosphorus during straightening process, Iron and Steel, **49**(5), 81(2014)
(王 畅, 于 洋, 王 林, 陈 瑾, 徐海卫, 含磷高强 IF 钢拉矫断带的原因及机制, 钢铁, **49**(5), 81(2014))

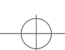
5 T. Nakagawa, T. Umeda , J. Murata, Y.a Kamimura, N. Niwa, Deformation behavior during solidification of steels, ISIJ Int., **35**(6), 723(1995)

6 C. H. Yu, M. Suzuki, H. Shibata, T. Emi, Simulation of crack formation on solidifying steel shell in continuous casting mold, ISIJ Int., **36**(Suppl.), s159(1996)

7 H. G. Suzuki, S. Nishimura, J. Imamura, Y. Nakamura, Hot ductility in steels in the temperature range between 900 and 600℃, Tetsu-to-Hagane, **67**(8), 1180(1981)

8 DI Hongshuang, KANG Xiangdong, WANG Guodong, LIU Xxianghua, High temperature mechanical properties of low carbon steel, Journal of Northeastern University (Natural Science), **25**(1), 40 (2004)
(邸洪双, 康向东, 王国栋, 刘相华, 低碳钢的高温力学性能, 东北大学学报(自然科学版), **25**(1), 40(2004))

9 B. Mintz, The influence of composition on the hot ductility of steels



and the problem of transverse cracking, ISIJ Int., **39**(9), 833(1999)

10 WANG Xinhua, ZHU Guoseng, YU Huixiang, WANG Wanjun, High temperature properties of continuous casting high carbon steels, Journal of University of Science and Technology Beijing, **27**(5), 545(2005)
(王新华, 朱国森, 于会香, 王万军, 高碳钢连铸板坯高温力学性能, 北京科技大学学报, **27**(5), 545(2005))

11 YONG Qilong, *Second Phases in Steel Material*, (Beijing, Metallurgical Industry Press, 2006) p.145
(雍岐龙, 钢铁材料中的第二相, (北京, 冶金工业出版社, 2006) p.145)

12 ZHANG Dongbin, WU Chengjian, YANG Rang, Grain boundary segregation of P in Fe-P and Fe-P-Ce alloys and effect on their brittleness, Acta Metallurgica Sinica, **27**(2), 111(1991)
(张东彬, 吴承建, 杨让, Fe-P与Fe-P-Ce合金中的晶界磷偏聚及其对脆性的影响, 金属学报, **27**(2), 111(1991))

13 YIN Guili, ZHOU Lidai, LIN Cheng, Effect of the valence electron structures of phosphide on cold short in steel, Ordnance material science and engineering, **32**(3), 11(2009)
(尹桂丽, 周立岱, 林 成, 钢中磷化物的相价电子结构及其对冷脆的影响, 兵器材料科学与工程, **32**(3), 11(2009))

14 ZHAO Rigetu, WANG Zhongwei, LI Haigang, Analysis of phosphide Fe_3P in 82MnA steel billet , Physical Testing and Chemical Analysis Part A(Physical Testing), **47**(6), 340(2011)
(照日格图, 王忠伟, 李海刚, 82MnA钢连铸坯中的磷化物Fe_3P分析, 理化检验-物理分册, **47**(6), 340(2011))